

СИНХРОНИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦЕНТРОВ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ФАЗЫ В ОЛОВЯННОМ ВИСКЕРЕ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ ОБЛУЧЕНИИ

В. И. Кузнецов, В. А. Тулин*

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов
Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская область, Россия*

Поступила в редакцию 25 сентября 1997 г.

Экспериментально изучались вольт-амперные характеристики (ВАХ) системы с переменным числом центров проскальзывания фазы, образующейся при фазовом расщеплении оловянного вискера с током во внешнем сверхвысокочастотном (СВЧ) поле частоты $\Omega/2\pi \cong 35\text{--}45$ ГГц. Исследован процесс зарождения и исчезновения ступенек нулевого наклона на ВАХ при напряжениях $U_{m/n} = (m/n)U_\Omega$, где m, n — целые числа, а U_Ω определяется соотношением Джозефсона $\hbar\Omega = 2eU_\Omega$. Обнаружено, что СВЧ-генерация центров проскальзывания фазы характеризуется негармоничностью излучения и возможностью синхронизации внутренних СВЧ-колебаний системы центров проскальзывания фазы внешним переменным полем на n -гармонике собственного излучения. Величина СВЧ-мощности, генерируемой вискером, оценивается как 10^{-8} Вт. Наблюдается стимуляция сверхпроводимости вискером с током.

1. ВВЕДЕНИЕ

Генерация сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний, возникающая при приложении напряжения к джозефсоновскому переходу (элементу слабой связи в сверхпроводящей цепи), постоянно привлекает внимание исследователей со времени открытия нестационарного эффекта Джозефсона. Простота устройства и управления частотой генерации — основные причины этого. Частота генерации перехода определяется соотношением

$$\omega = 2Ue/\hbar,$$

где U — падение напряжения на переходе, e — заряд электрона и \hbar — постоянная Планка. Недостатками этих генераторов являются малая мощность и некоторые проблемы согласования сверхпроводящих цепей, содержащих джозефсоновский генератор, с СВЧ-линиями. Преодолеть эти недостатки пытаются путем использования сети коротких переходов [1–4].

Джозефсоновские переходы имеют характерный линейный масштаб в направлении перпендикулярном течению сверхтока — джозефсоновскую глубину проникновения λ_j . Если размер перехода в направлении перпендикулярном течению сверхтока удовлетворяет условию $d < \lambda_j$ (короткий переход), то изменение фазы в переходе имеет пространственно-однородный характер и мы имеем дело с единичным источником

*E-mail: tulin@ipmt-hpm.ac.ru

излучения. В случае сетки коротких взаимно синхронизованных переходов при эффективной связи можно надеяться на большую выходную СВЧ-мощность, близкую к суммарной мощности отдельных элементов. К подобной же системе можно отнести длинный однородный сверхпроводящий канал с центрами проскальзывания фазы. Центры проскальзывания фазы возникают в резистивном состоянии длинного узкого канала при постоянном токе и температуре, близких к критическим ($I > I_c$, $T < T_c$) [5, 6]. Реализацией узкого длинного сверхпроводящего канала являются тонкие пленки с шириной w и монокристаллические нити (вискеры) с диаметром d меньшими длины когерентности сверхпроводника ξ . С точки зрения исследований сверхпроводящих каналов более предпочтительны вискеры (нитевидные кристаллы), обладающие высокой однородностью по длине. С точки зрения прикладного использования преимущество за узкими пленками, геометрические размеры которых контролируются в процессе изготовления. Однако микронеоднородности, связанные с технологией изготовления, могут существенно ограничить свойства центров проскальзывания фазы, при этом они будут вести себя аналогично системе слабых сверхпроводящих связей, локализованных вдоль узкой пленки.

Отдельный центр проскальзывания фазы представляет собой «локализованное в пространстве» нестационарное неоднородное образование с внутренней областью порядка ξ , где происходят высокочастотные колебания параметра порядка сверхпроводника с частотой Джозефсона $\omega = 2eU_\omega/\hbar$. Вблизи критической температуры среднее за период напряжение U_ω на центре проскальзывания фазы возникает вследствие проникновения продольного неоднородного электрического поля во внешнюю область этого центра на расстояние порядка l_E (глубина проникновения электрического поля), сопротивление току каждого центра проскальзывания фазы равно $R_0 = 2\rho_N l_E/S$, здесь ρ_N — удельное сопротивление проводника в нормальном состоянии, S — площадь поперечного сечения канала [5–8]. В момент обращения в нуль модуля параметра порядка разность фаз на центре проскальзывания фазы испытывает скачок на 2π . Вольт-амперные характеристики (ВАХ) таких сверхпроводящих каналов имеют сеть наклонных линейных участков с сопротивлением $R_n = nR_0$ (n — целое число), разделенных скачками напряжения. Продолжения этих линейных участков пересекают ось токов приблизительно в одной точке I_0 (избыточный ток) [5–7, 9].

Несмотря на множество работ по центрам проскальзывания фазы [5, 6], динамика развития системы центров проскальзывания фазы при различных механизмах внутреннего взаимодействия мало изучена [7, 8, 10–12]. При взаимодействии с внешним электромагнитным излучением обратный переменный эффект Джозефсона наблюдался в узких тонких пленках Sn на частоте 10 ГГц [7] и в монокристаллических нитях (вискерах) на частотах до 900 МГц [13–15]. В обоих этих случаях на ВАХ, помимо наклонных ступеней, появлялась основная ступень нулевого наклона при напряжении U_Ω в области существования одного центра проскальзывания фазы, связанная с высокочастотными колебаниями параметра порядка в центре, и «слабые» ступени при $U_{m/n}$ (U_Ω — напряжение, соответствующее частоте облучения в соотношении (1), и $U_{m/n} = (m/n)U_\Omega$, где m и n — целые числа). В [16] обратный переменный эффект Джозефсона в сверхпроводящем канале исследовался в рамках микроскопической теории. Полная картина развития различных ступеней нулевого наклона при изменении постоянного тока и внешнего электромагнитного поля в системе с изменяющимся числом центров проскальзывания фазы не исследована. Вискер с током в сверхвысокочастотном поле на частотах выше 900 МГц вообще не изучался.

2. ОБРАЗЦЫ И ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе мы исследовали изменение ВАХ субмикронных оловянных вискеро́в под действием электромагнитного облучения на частотах 35–45 ГГц в режиме, когда в области напряжения U_Ω существует несколько центров проскальзывания фазы в образце. В [7, 13–15] специально выбирались такие параметры T и $\Omega/2\pi$, чтобы среднее напряжение U_ω на одном центре, определяющее основную частоту собственных высокочастотных колебаний $\omega = 2Ue/\hbar$, могло быть равным напряжению U_Ω , т. е. чтобы частота ω внутренних колебаний могла бы совпадать с внешней частотой облучения Ω . Мы использовали большую внешнюю частоту $\Omega/2\pi$ и работали при несколько большем отдалении от критической температуры T_c , чем в [13–15], так что могло быть выполнено условие $U_\omega = U_\Omega/n$, т. е. $n\omega = \Omega$ ($n > 1$), при наличии в области напряжений U_Ω нескольких центров проскальзывания фазы. В [16] в рамках микроскопической теории показано, что именно при этом условии возникают индуцированные ступени на ВАХ при напряжениях U_Ω/n . Наличие таких ступеней означает негармоничность собственного излучения системы центров проскальзывания фазы. Большая однородность по длине и меньшее число структурных дефектов, чем у пленок, обусловили выбор вискеро́в в качестве объектов исследования. Кроме того, ступени нулевого наклона на ВАХ облученных вискеро́в [13–15] выражены значительно сильнее, чем на узких пленках [7]. Во многих работах, например в [17], вместо высокочастотных колебаний в узких пленках регистрируются низкочастотные. Вискеры, выросшие из тонкой пленки олова, напыленной на кремниевую пластину, имели диаметр $d = 0.2\text{--}0.8$ мкм, длину порядка 1 мм, отношение сопротивлений $R_{300}/R_{4.2} < 100$ и $T_c \approx 3.7$ К. Вискер помещался поперек разреза шириной около 300 мкм в оловянной пленке толщиной порядка 1000 Å. Крепление вискеро́в к подложке с пленочными электродами в начальный момент осуществлялось за счет электростатических сил, а впоследствии, по-видимому, за счет ван-дер-ваальсовских сил. Удалить вискер с поверхности подложки было непросто. Соприкосновение большей части образца с полированной поверхностью подложки, вероятно, обеспечивало хороший теплоотвод, поэтому ВАХ практически не имели гистерезиса в исследуемом диапазоне температур в отличие от ВАХ в [13–15]. Измерения ВАХ осуществлялись как двухконтактным способом (это возможно благодаря тому, что T_c пленки выше, чем у вискера), так и четырехконтактным. Подложка с вискером находилась внутри медного СВЧ-волновода и экранировалась сверхпроводящим свинцовым экраном. Температурные зависимости критического тока и сопротивления одного центра проскальзывания фазы при $T_c - T < 10$ мК имели вид типичный для вискеро́в ($I_c \propto (1 - T/T_c)^{3/2}$, $R_0 \propto (1 - T/T_c)^{-1/4}$) [13].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В совокупности вольт-амперные характеристики образцов имели кусочно-линейный вид, т. е. представляли собой набор линейных отрезков, соединенных более крутыми нелинейными участками. На рис. 1 представлены примеры ВАХ сверхпроводящих вискеро́в при отсутствии СВЧ облучения. Начальные участки ВАХ вискеро́в в отсутствие облучения приведены также на рис. 2–4 (штриховые линии). Цифры около линейных наклонных участков на ВАХ вискеро́в соответствуют кратности их дифференциального сопротивления по отношению к сопротивлению отдельного центра про-

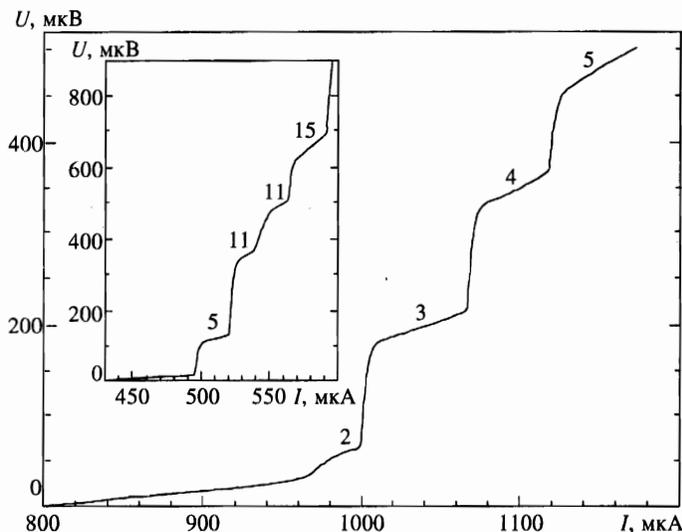


Рис. 1. ВАХ вискера Sn3 ($R_0 \approx 0.19$ Ом, $T_c \approx 3.71$ К, $R_{300}/R_{4.2} \approx 73$) без облучения внешним СВЧ-полем при температуре $T \approx 3.56$ К. На вставке изображена ВАХ образца Sn2 ($R_0 \approx 0.21$ Ом, $T_c \approx 3.72$ К, $d \approx 0.8$ мкм, $R_{300}/R_{4.2} \approx 50$) без облучения при температуре $T \approx 3.63$ К

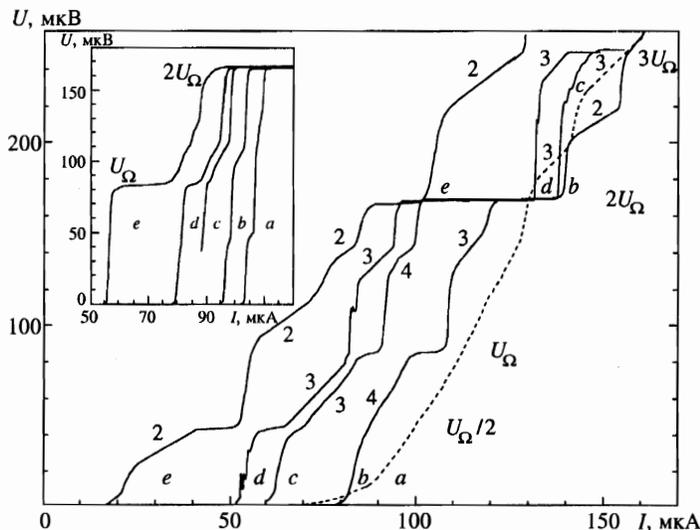


Рис. 2. Серия ВАХ Sn1 ($R_0 = 0.79-0.63$ Ом, $T_c \approx 3.69$ К, $d \approx 0.3$ мкм, $R_{300}/R_{4.2} \approx 20$) в зависимости от мощности внешнего электромагнитного облучения частоты $\Omega/2\pi = 40.62$ ГГц при температуре $T \approx 3.62$ К. Кривые: *a* — 70 дБ (штриховая), *b* — 36 дБ, *c* — 31 дБ, *d* — 30 дБ, *e* — 28.6 дБ. На вставке показана начальная часть серии ВАХ образца Sn1 при сходных параметрах в другом цикле измерения. Кривые: *a* — 32.6 дБ, *b* — 30.6 дБ, *c* — 29 дБ, *d* — 28 дБ, *e* — 25.2 дБ

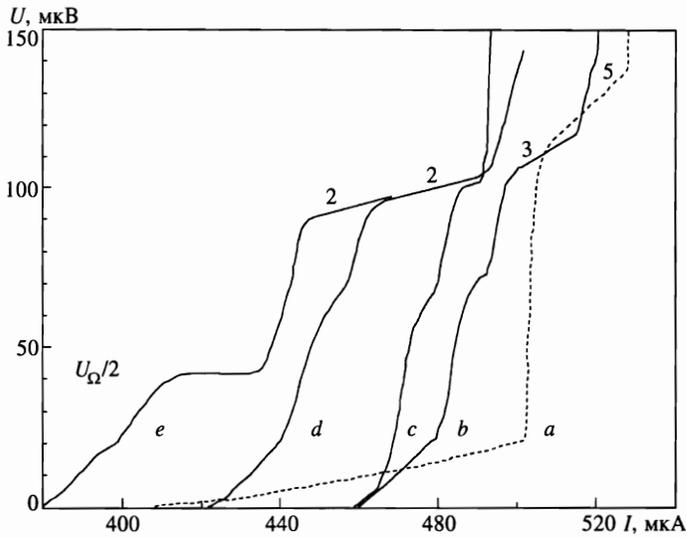


Рис. 3. Серия ВАХ образца Sn2 ($R_0 = 0.23-0.18$ Ом, $T_c \approx 3.72$ К, $d \approx 0.8$ мкм, $R_{300}/R_{4.2} \approx 50$) в зависимости от мощности облучения частоты $\Omega/2\pi = 40.62$ ГГц при температуре $T \approx 3.63$ К. Кривые: a — 70 дБ (штриховая), b — 30.2 дБ, c — 30 дБ, d — 28.2 дБ, e — 26.1 дБ

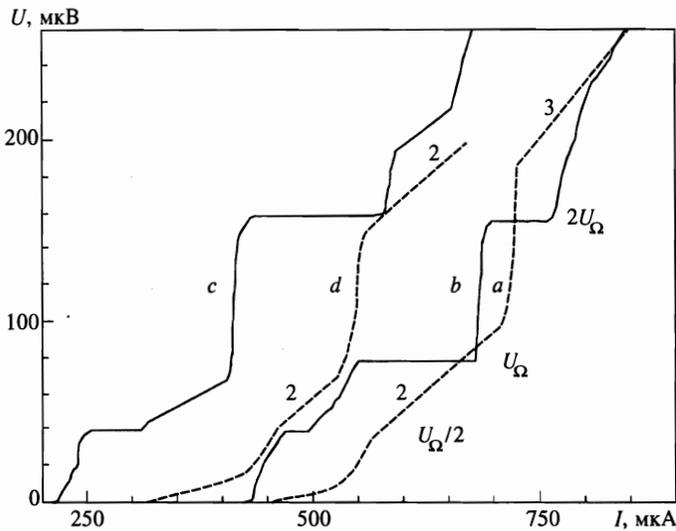


Рис. 4. ВАХ вискера Sn3 ($R_0 = 0.21$ Ом, $T_c \approx 3.71$ К, $R_{300}/R_{4.2} \approx 73$) в зависимости от мощности облучения частоты $\Omega/2\pi = 37.5$ ГГц при температуре $T \approx 3.58$ К (кривые a, b, c) и $T \approx 3.63$ К (кривая d); a — 70 дБ (штриховая), b — 19.5 дБ, c — 12 дБ, d — 70 дБ (штриховая)

скальзывания фазы R_0 . Величина R_0 определялась как наибольший общий делитель величин дифференциального сопротивления линейных участков ВАХ и сравнивалась с оценкой, полученной исходя из геометрических размеров и удельного сопротивления вискера. Линейные участки ВАХ соединяются нелинейными участками, которые в области исследуемых частот являются устойчивыми и обратимыми. Отметим, что в большинстве измерений начальные участки ВАХ после превышения критического тока (кривые a на рис. 2, 3) необлученных образцов имели нелинейный характер, а первые устойчивые линейные участки соответствовали состояниям с несколькими центрами проскальзывания фазы в системе (линейный участок $3R_0$ на кривой a рис. 2, $5R_0$ на кривой a рис. 3). В [13–15] при малых напряжениях удавалось устойчиво получать состояние с одним центром проскальзывания фазы. В отличие от [13–15], где разность $T_c - T$ была меньше 10 мК, ВАХ снимались нами чаще при температурах ниже T_c на 70–160 мК. В нашем случае состояния с малым числом центров проскальзывания фазы становились более устойчивыми при несколько большем удалении по температуре от T_c . Это видно при сравнении вольт-амперной характеристики, изображенной на рис. 1, с характеристикой, помещенной на вставку к этому рисунку. Кроме того, часто наблюдались разделенные скачком напряжения линейные участки одинакового сопротивления (например, $3R_0$ — кривая a на рис. 2 для Sn1, $2R_0$ — кривая d на рис. 4 для Sn3). На основании этих наблюдений мы заключаем, что, несмотря на некоторые осложнения в поведении ВАХ наших вискероов, они являются узкими сверхпроводящими каналами с центрами проскальзывания фазы при соответствующих температуре и транспортном токе.

При облучении наряду с линейными наклонными участками, связанными с наличием определенного числа центров проскальзывания фазы, на ВАХ возникают ступени нулевого наклона при напряжениях $U_{m/n} = (m/n)U_\Omega$. При малых мощностях облучения наблюдалось увеличение критического тока канала, т.е. стимуляция сверхпроводимости, теоретически обоснованная в [18]. Вместо обычного первого появления в процессе увеличения мощности ступени нулевого наклона при напряжении U_Ω , как это наблюдалось в [13–15], последовательно возникали ступени при $2U_\Omega$, U_Ω , $3U_\Omega$, $U_\Omega/2$ для образца Sn1 (рис. 2), для Sn2 (рис. 3) соответственно при $U_\Omega/2$, потом ступень при U_Ω (не показана). При понижении температуры необычный вид ВАХ необлученного образца, заключающийся в существовании линейных участков одинакового наклона (кривая d на рис. 4) или начальных линейных участков с большим числом центров проскальзывания фазы, сменялся видом близким к обычному. При меньших температурах последовательность возникновения индуцированных ступеней на ВАХ вискера при увеличении облучения также становилась похожа на обычную. Тогда первой проявлялась ступень при напряжении U_Ω , затем ступень при $2U_\Omega$, а при больших мощностях облучения ступень при $U_\Omega/2$ (см. рис. 4). Характеристики становились схожими с приведенными в [13–15]. При увеличении мощности облучения на ВАХ более устойчиво проявлялись наклонные линейные участки, связанные с центрами проскальзывания фазы (рис. 2, 3).

Возникновение ступеней нулевого наклона происходит на линейных участках ВАХ, которые или существуют на необлученном образце, или возникают при СВЧ-воздействии. Например, зарождению ступени нулевого наклона при U_Ω на ВАХ вискера Sn1 (вставка к рис. 2) предшествует образование линейного наклонного участка, увеличение его длины и «сползание» нижнего его конца в область требуемого напряжения (кривые a , b , c вставки на рис. 2). Как только конец линейного участка попадает в область U_Ω , сразу возникает ступень нулевого наклона (кривая d) и длина ее возрастает с увеличе-

нием мощности (кривая *e*). Аналогично образуются ступени при $U_{\Omega}/2$ (кривые *c*, *d*, *e* на рис. 2). Ступень при напряжении $3U_{\Omega}$ (кривая *c* на рис. 2) образуется, когда наклонная линейная ступень с сопротивлением $3R_0$ «сползает» в эту область. Исчезновение ступени нулевого наклона (например, при напряжениях $3U_{\Omega}$, U_{Ω} , $U_{\Omega}/2$) при увеличении СВЧ-мощности происходит тогда, когда верхний конец линейного участка опускается ниже напряжения наблюдения ступени, а на это место попадает вертикальный участок ВАХ. При этом скачком может меняться кратность линейного участка (кривые *d*, *e* на рис. 2), при напряжении $\approx 3U_{\Omega}$ она изменилась с 3 до 2. Таким образом, для образования и существования ступени нулевого наклона необходимо наличие линейного участка при напряжении $U_{m/n}$ на ВАХ необлученного или облученного образца, т. е. существование необходимого устойчивого числа центров проскальзывания фазы в системе.

При изменении частоты внешнего электромагнитного излучения Ω мы могли видеть не наблюдаемые на прежней частоте ступени нулевого наклона тогда, когда напряжение $U_{m/n}$ попадало на линейный наклонный участок ВАХ необлученного вискера.

Линейные наклонные участки на отдельной кривой ВАХ облученного вискера при фиксированной мощности, соответствующие определенному количеству центров проскальзывания фазы, могли уменьшать свою кратность по отношению к сопротивлению отдельного центра проскальзывания фазы при увеличении постоянного транспортного тока (например, кривая *b* на рис. 2). Кратность могла и не меняться (кривая *e* на рис. 2 — кратность 2). При переходе от одной ВАХ к другой при большей мощности облучения кроме подавления критического и избыточного тока вблизи области одного и того же напряжения на ВАХ кратность линейных участков также уменьшалась. На кривых рис. 2 кратность изменялась от 4 до 2, а на кривых рис. 3 — от 5 до 2. На ВАХ вискера Sn2 (рис. 3) в области напряжений выше U_{Ω} вначале существовал участок с сопротивлением $5R_0$, потом с $3R_0$ и $2R_0$. Далее длина участка $2R_0$ увеличивалась с увеличением мощности, и кратность не менялась. Отметим, что значение R_0 при облучении могло меняться при изменении мощности в пределах 20%. Таким образом, СВЧ-облучение не только индуцирует ступени постоянного напряжения, но и сильно влияет на вольт-амперные характеристики вискеро́в.

Мы проследили за изменением длин индуцированных ступеней при увеличении внешнего переменного поля за период от возникновения до исчезновения. Экспериментальные зависимости нормированной по току длины ступенек нулевого наклона при напряжениях U_{Ω} и $2U_{\Omega}$, а также критического тока для образца Sn1 для двух измерений, проведенных в разных циклах при близких параметрах, от относительной амплитуды СВЧ-поля показаны на рис. 5. Для сравнения помещены модули функций Бесселя нулевого, первого и второго порядков, $J_0(x)$, $J_1(x)$, $J_2(x)$, хотя мы считаем, что наши зависимости не связаны с этими функциями. Отметим основные особенности рис. 5. 1) Наблюдаемая стимуляция сверхпроводимости в канале приводит к увеличению критического тока примерно на 20%. 2) Ступень нулевого наклона при $2U_{\Omega}$ появляется первой и имеет максимальную длину примерно $0.5I_c$. 3) Ступень при напряжении U_{Ω} во втором цикле измерений (в первом она слаба и не показана на рисунке) проявляется при больших амплитудах внешнего поля, и при ее возникновении происходят существенные преобразования в зависимостях длины другой ступени, наблюдаемой при $2U_{\Omega}$, и критического тока от внешнего электромагнитного поля. При этом критический ток и ступень при $2U_{\Omega}$ исчезают в области гораздо больших значений амплитуд внешнего поля, чем в первом цикле. 4) Индуцированные ступени при напряжениях U_{Ω} , $2U_{\Omega}$ возникают и постепенно увеличиваются начиная с некоторой ненулевой мощно-

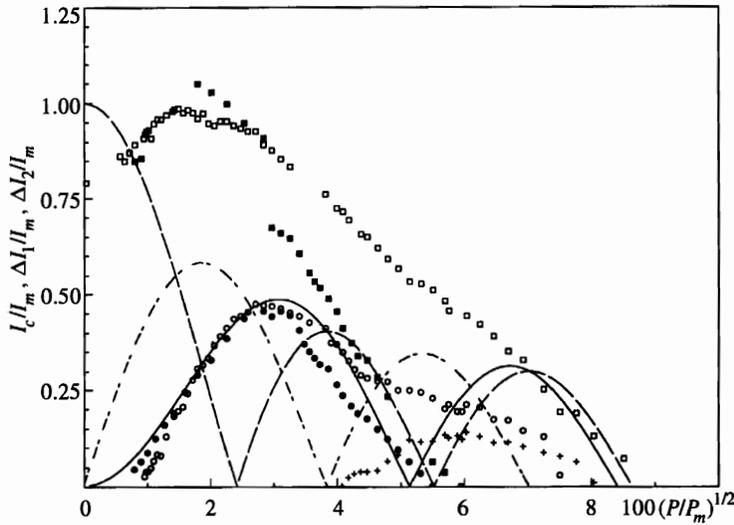


Рис. 5. Зависимости нормированного критического тока I_c/I_m от относительной амплитуды внешнего электромагнитного поля частоты $\Omega/2\pi = 40.62$ ГГц при температуре $T \approx 3.62$ К для вискера Sn1 в двух различных циклах измерений (\blacksquare — данные первого цикла, \square — данные второго цикла), $I_m \approx 107$ мкА. Зависимости от относительной амплитуды СВЧ-поля нормированных токовых длин ступенек нулевого наклона, возникающих на ВАХ при напряжении U_Ω (+ — данные второго цикла) и при напряжении $2U_\Omega$ (\bullet — первый цикл, \circ — второй). Штриховая, штрихпунктирная, сплошная линии соответствуют модулям функций Бесселя $J_0(x)$, $J_1(x)$, $J_2(x)$; $x = 100(P/P_m)^{1/2}$, P — мощность, P_m — максимальная мощность на выходе СВЧ-генератора

сти облучения. Существует как бы некоторый «пороговый» уровень СВЧ-мощности для образования этих ступеней. Он связан с упомянутым выше «сползанием» линейного наклонного участка ВАХ до соответствующего напряжения (U_Ω , $2U_\Omega$). 5) Наблюдается только один «период» изменения (от возникновения до исчезновения) длин ступеней и критического тока в зависимости от облучения. Отсутствуют осцилляции в зависимостях длин ступеней и критического тока от сверхвысокочастотного поля.

При изучении зависимости длины ступеней постоянного напряжения от СВЧ-мощности в нескольких случаях наблюдалось их немонотонное поведение с относительно резкими провалами на общей куполообразной форме кривой.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для однородного сверхпроводящего канала, которым мы представляем вискер, вид вольт-амперной характеристики зависит от его длины. В случае короткого рабочего участка вискера, $l \approx l_E$, возникновение одного центра проскальзывания фазы приводит к возможности протекания по участку большего тока. Если же $l \gg l_E$, то экспоненциальные малые «хвосты» практически не меняют свойства канала вдали от единственного центра проскальзывания фазы. Вследствие этого, чтобы канал был способен пропускать ток больше критического, в нем необходимо возникновение нескольких центров

проскальзывания фазы, число которых определяется длиной канала. В случае наших образцов имело место неравенство $l \gg l_E$ ($l \approx 10l_E - 20l_E$), на основании чего можно предположить, что для стабильного протекания тока, даже слегка превышающего критический, необходимо несколько центров проскальзывания фазы. Процесс установления этого необходимого количества может сопровождаться возникновением неустойчивого, переменного (во времени и в пространстве) количества центров проскальзывания фазы.

ВАХ наших образцов имеют кусочно-линейный вид с дифференциальным сопротивлением, описываемым соотношением $R = nR_0$, где n — целое число. Это соответствует существованию в местах линейных участков определенного количества центров проскальзывания фазы, что следует ожидать исходя из геометрических размеров образцов. Кроме того, имеются нелинейные участки, где, по-видимому, число центров проскальзывания фазы неустойчиво и меняется во времени. Подтверждение этого обстоятельства требует дополнительных исследований. Линейные участки ВАХ сверхпроводящего канала с центрами проскальзывания фазы в упрощенной модели [7] описываются выражением $U = nR_0(I - I_0)$. Избыточный ток I_0 обычно связывают с усредненной сверхпроводящей компонентой полного тока I . Для экспериментальных характеристик это соотношение обычно строго не выполняется ($I_0 \neq \text{const}$ для разных групп линейных участков [9]). На ВАХ наших образцов встречаются соседние линейные участки с одинаковыми значениями n , но с различными токами I_0 .

СВЧ-облучение влияет на ВАХ наших образцов двояким образом. Первое — это возникновение ступеней постоянного напряжения, что является основным предметом данной статьи. Второе проявление состоит в изменении числа центров проскальзывания фазы при облучении и стабилизации участков ВАХ с определенным числом этих центров. Экспериментально это проявляется в том, что часть нелинейных областей ВАХ превращается в кусочно-линейные и увеличивается длина линейных участков.

Существование при СВЧ-облучении ступеней постоянного напряжения указывает на то, что в области центров проскальзывания фазы существуют СВЧ-токи со спектральными составляющими на частотах $\omega = 2enU_\omega/\hbar$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. При совпадении частоты внешнего облучения с какой-либо гармоникой из вышеуказанного ряда происходит синхронизация, что проявляется в виде ступени постоянного напряжения на образце $U_m = mU_\omega$, где m — число центров проскальзывания фазы, $U_\omega = \hbar\Omega/2en$ и Ω — частота внешнего облучения. В результате ступени могут возникать при напряжениях $U_{m/n} = (m/n)\hbar\Omega/2e$, если эти напряжения попадают на существующие или индуцированные СВЧ-излучением линейные участки ВАХ с определенным (целым) числом центров проскальзывания фазы. К сожалению, достоверно определить из ВАХ реальные значения m и n при наличии облучения трудно. Только при определенных параметрах проявлялись линейные участки вблизи ступеней нулевого наклона, отражающие реальное число центров проскальзывания фазы m . Мы предполагаем, что на рис. 2 ступень при $U_\Omega/2$ является результатом синхронизации двух центров проскальзывания фазы на четвертой гармонике собственного излучения, т. е. $U_\Omega/2 \rightarrow 2U_\Omega/4$, аналогично $U_\Omega \rightarrow 4U_\Omega/4$, $2U_\Omega \rightarrow 4U_\Omega/2$, $3U_\Omega \rightarrow 6U_\Omega/2$, ступень при $4U_\Omega \rightarrow 8U_\Omega/2$ не показана; на рис. 4 $U_\Omega/2 \rightarrow 2U_\Omega/4$, $U_\Omega \rightarrow 2U_\Omega/2$, $2U_\Omega \rightarrow 4U_\Omega/2$; на рис. 3 $U_\Omega/2 \rightarrow 2U_\Omega/4$; на рис. 6 $U_\Omega/2 \rightarrow 3U_\Omega/6$, $2U_\Omega/3 \rightarrow 4U_\Omega/6$, $U_\Omega \rightarrow 6U_\Omega/6$, при других параметрах на этом образце наблюдались ступени $5U_\Omega/6 \rightarrow 5U_\Omega/6$, $U_\Omega/3 \rightarrow 2U_\Omega/6$ (на рисунках не показаны).

Итак, при определенном положении на ВАХ вискера СВЧ-поле синхронизирует осцилляции параметра порядка всех присутствующих центров проскальзывания фазы, что

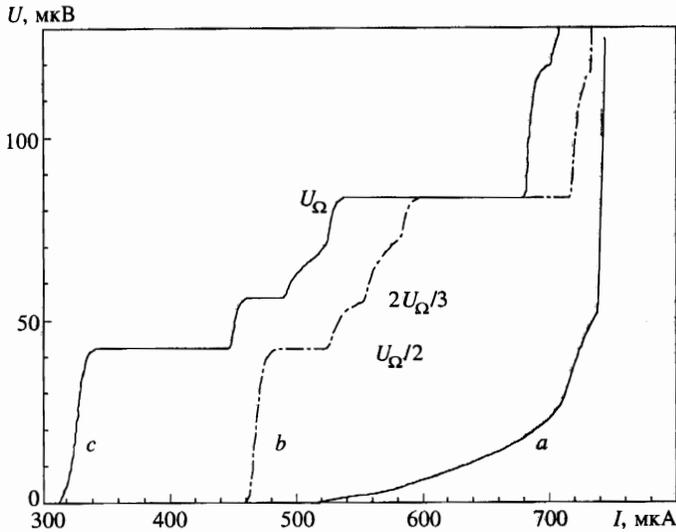


Рис. 6. Начальная часть серии ВАХ образца Sn2 в зависимости от мощности облучения частоты $\Omega/2\pi = 40.62$ ГГц во втором цикле измерения при $T \approx 3.60$ К. Кривые: a — 70 дБ, b — 24.49 дБ, c — 22 дБ

приводит к постоянному падению напряжения как на отдельных центрах, так и на всем образце. Состояние с синхронизованными центрами проскальзывания фазы при наличии СВЧ-поля существует и предпочтительно в соответствующих местах ВАХ. Другие участки ВАХ могут удовлетворять состояниям, когда часть центров проскальзывания фазы синхронизована внешним облучением, а часть — нет. Такое предположение дает возможность объяснить уменьшение кратности (и вообще, поведение кратности) ступеней при увеличении тока под облучением. Можно объяснить и существование соседних ступеней с одной кратностью, но с различным избыточным током. Существование такого же явления без облучения может представлять несколько другую, но отчасти аналогичную картину. В экспериментах с туннельными джозефсоновскими переходами известны так называемые ступени Фиске [19], которые соответствуют захвату частоты генерации перехода имеющимся в конструкции образца СВЧ-резонатором. При этом на вольт-амперных характеристиках возникают участки постоянного напряжения, отвечающие соотношению Джозефсона с собственными частотами конструкционного резонатора. Наши образцы имеют конструкционный резонатор, им может являться разрез в оловянной пленке, в который мы монтировали вискер. Длина этого разреза составляет около 5 мм, что в совокупности с кремниевой подложкой ($\epsilon \approx 12$) даст собственную частоту разреза в нужном диапазоне СВЧ. При этом на группе существующих центров проскальзывания фазы в некотором диапазоне изменения тока может возникнуть участок постоянного напряжения (ступенька Фиске). Оставшиеся незахваченные центры по-прежнему демонстрируют линейное поведение. В совокупности вольт-амперная характеристика образца в этом месте будет иметь участок с наклоном, отвечающим числу незахваченных центров проскальзывания фазы, меньшему реально существующего. Почему отсутствуют чисто горизонтальные ступени, остается вопросом. Многие сомнения в интерпретации были бы сняты после прямого исследования СВЧ-генерации

образца.

На рис. 5 приведены зависимости длины ступеней постоянного напряжения от относительной величины СВЧ-поля. Максимальная длина этих ступеней позволяет оценить мощность, генерируемую вискером, как

$$P \approx (\Delta I)^2 m R_0,$$

где ΔI — длина ступени по току. Отсюда $P \approx 10^{-8}$ Вт.

Природа СВЧ-генерации в центрах проскальзывания фазы объясняется поведением параметра порядка, который в некоторый момент времени обращается в нуль по модулю, а затем восстанавливается до некоторого значения. В момент обращения в нуль модуля параметра порядка фазовый сдвиг по разные стороны центра проскальзывания фазы уменьшается на 2π . Представляет интерес оценить времена этих процессов и сравнить их обратные величины с частотой осцилляций параметра порядка и частотой внешнего облучения. Наиболее значительным является время восстановления модуля параметра порядка τ_Δ . Когда τ_Δ много больше периода осцилляций параметра порядка, определяемого джозефсоновским соотношением, и среднее, и мгновенное значения модуля параметра порядка внутри центра проскальзывания фазы будут много меньше равновесного значения в окружающих областях сверхпроводящего канала. Если τ_Δ порядка или меньше периода осцилляций параметра порядка, мгновенное значение щели в центре проскальзывания фазы достигает больших значений, близких к значению в окружающих частях канала. Спектры нормальных возбуждений центра проскальзывания фазы в этих двух случаях должны заметно различаться, что может привести к различию в каких-то чертах электрических свойств центров проскальзывания фазы. Поскольку энергетическое время релаксации носителей в олове составляет величину $3 \cdot 10^{-10}$ с, в СВЧ-диапазоне реализуется первый случай.

Поведение длины ступени по току определяется двумя обстоятельствами. Первое — это собственно зависимость длины ступени от мощности на фоне неограниченного наклонного участка ВАХ с определенным числом центров проскальзывания фазы. Второе — это ограничение длины ступени постоянного напряжения длиной наклонного участка ВАХ, которая, как показывает эксперимент, зависит также от мощности СВЧ-облучения. Изменение числа центров проскальзывания фазы нарушает начальные условия синхронизации. Система попадает после этого либо в полностью несинхронизованное состояние, либо в частично синхронизованное, либо в полностью синхронизованное состояние на другой гармонике с другим числом центров проскальзывания фазы (например, ступень нулевого наклона при напряжении $2U_\Omega$ на вольт-амперных характеристиках, помещенных на рис. 2, может соответствовать синхронизации четырех центров проскальзывания фазы на второй гармонике и шести на третьей). Наличие этих двух обстоятельств не позволяет получить в чистом виде зависимость длины ступени постоянного напряжения от СВЧ-мощности и сравнить ее с теоретической моделью. Существование «порогового» уровня мощности облучения, при котором возникают индуцированные ступени, и отсутствие периодических колебаний в зависимостях длин ступеней нулевого наклона при $U_{m/n}$ и критического тока от внешнего электромагнитного поля связаны с наличием устойчивого необходимого числа центров проскальзывания фазы при этих напряжениях.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изучено влияние СВЧ-облучения на вольт-амперные характеристики оловянных вискеро́в субмикронных размеров. Показано, что такие вискеры могут служить источником электромагнитного СВЧ-поля до частот порядка 40 ГГц мощностью порядка 10^{-8} Вт. Генерация имеет сложный гармонический состав и осуществляется в областях ВАХ с устойчивым числом центров проскальзывания фазы. На характерные черты ВАХ образцов под облучением большое влияние оказывают моменты изменения числа центров проскальзывания фазы в канале и степень синхронизации генерации системы этих центров внешним электромагнитным СВЧ-полем.

Работа выполнена в рамках проекта 95021 РНТП АНФКС подпрограммы «Сверхпроводимость» и проекта 1-084/4 РНТП «Физика твердотельных наноструктур».

Литература

1. D. W. Palmer and J. E. Mercereau, Appl. Phys. Lett. **25**, 467 (1974).
2. M. Octavio and W. J. Skocpol, J. Appl. Phys. **50**, 3505 (1979).
3. Л. Э. Аматауни, В. Н. Губанков, А. В. Зайцев, Г. А. Овсянников, ЖЭТФ **83**, 1851 (1982).
4. Л. Э. Аматауни, В. Н. Губанков, Г. А. Овсянников, ФНТ **9**, 939 (1983).
5. Б. И. Ивлев, Н. Б. Копнин, УФН **142**, 435 (1984).
6. R. Tidecks, *Current-induced nonequilibrium phenomena in quasi-one-dimensional superconductors*. Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 121, Springer (1990).
7. W. J. Skocpol, M. R. Beasley, and M. Tinkham, J. Low Temp. Phys. **16**, 145 (1974).
8. С. М. Гольберг, Н. Б. Копнин, М. И. Трибельский, ЖЭТФ **94**(4), 289 (1988).
9. J. Meyer and G. Minnigerode, Phys. Lett. A **38**, 529 (1972).
10. J. D. Meyer and R. Tidecks, Sol. State Commun. **24**, 639 (1977).
11. M. Tinkham, J. Low Temp. Phys. **35**, 147 (1979).
12. X. Yang and R. Tidecks, Z. Phys. B **83**, 113 (1991).
13. R. Tidecks and G. von Minnigerode, Phys. Stat. Sol. (a) **52**, 421 (1979).
14. R. Tidecks and G. Slama, Z. Phys. B **37**, 103 (1980).
15. B. Damaschke and R. Tidecks, Z. Phys. B **77**, 17 (1989).
16. В. И. Ивлев and Н. В. Копнин, Sol. State Commun. **41**, 107 (1982).
17. Г. Е. Чурилов, В. М. Дмитриев, В. Н. Светлов, ФНТ **9**, 495 (1983).
18. Г. М. Элиашберг, Письма в ЖЭТФ **11**, 186 (1970).
19. M. D. Fiske, Rev. Mod. Phys. **36**, 221 (1964).